



TITLE:

核融合発電所の将来電力系統への 受容性に関する研究(Abstract_要 旨)

AUTHOR(S):

武田, 秀太郎

CITATION:

武田, 秀太郎. 核融合発電所の将来電力系統への受容性に関する研究. 京都大学, 2018, 博士(エネルギー科学)

ISSUE DATE:

2018-03-26

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k21195>

RIGHT:

Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, Plasma Control Requirements for Commercial Fusion Power Plants: A Quantitative Scenario Analysis With a Dynamic Fusion Power Plant Model. IEEE Transactions on Plasma Science, 2018. PP(99): p. 1-6. © 2018 IEEE. DOI: 10.1109/TPS.2018.2794560 ; Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, Dynamic Simulation-Based Case Study of Fusion on Small-Scale Electrical Grids. Fusion Science and Technology, 2017. 68(2): p. 341-345. This is an Accepted Manuscript of an article published by Taylor & Francis in Fusion Science and Technology on 20 Mar 2017, available online: <http://www.tandfonline.com/10.13182/FST15-106>. DOI: 10.13182/FST15-106 ; Shutaro Takeda, Shigeki Sakurai, Yasushi Yamamoto, Ryuta Kasada and Satoshi Konishi, Requirements for DEMO from the Aspect of Mitigation of Adverse Effe ...

(続紙 1)

京都大学	博士 (エネルギー科学)	氏名	武田 秀太郎
論文題目	核融合発電所の将来電力系統への受容性に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、将来の核融合発電プラントの導入に際し、想定される電力系統の特性を考察し、その安定性に着目して、計画外停止が一定の確率で避けがたいと考えられる核融合の特性からその適合性を分析し、核融合炉設計における主要諸元の選択の指針を示すとともに、電力システムの挙動を考察したその成立可能性を論じたものであり、全8章よりなる。</p> <p>第1章は序論で、まず世界の核融合炉開発および設計の状況、特に発電に向けた原型炉の概念を概観し、プラントとしての検討が進展する一方それが結合されるべき電力系統の状況、系統への影響、さらには電力システムの視点から見た設計条件への反映などの検討がほとんどなされていないことを指摘した。特に核融合のように将来の基幹的なエネルギー源を目標とする場合、その接続先である将来の電力系統が現在の我が国や欧州の状況から大きく異なる可能性があることから、本論文の明らかにすべき課題として炉設計と電力系統の関係の理解と分析の必要性を認識し、問題設定を行っている。</p> <p>第2章では、世界の電力システムの現状とその将来にわたる変化の方向性を分析し、いくつかの考慮すべき特性を抽出している。従来、電力系統は単一ないし極めて少数の事業者が、複数の異なる容量と制御性と特性を持った電力源を同期して接続し、同時同量原則で需要に対して正確に対応した供給量の制御によって、特に周波数の制御が行われており、その失敗が大規模停電や産業への重大な影響になりうることを示した。一方、気候変動問題への対応は、世界的に発電量が制御できない再エネ電源や負荷追従性の乏しい原子力の比率を高めるため、電力系統の安定性において脆弱化の恐れがあることを共通の傾向として抽出した。特に先進国においては現在進められている電力市場の自由化、送配電の分離による制御性の低下がみられる一方、今後の電力需要増加の大部分が予想される途上国においては電力系統の規模が小さく、これから建設整備される電力系統として代表的には 45-90GW 程度のグループが重要であることを見出した。</p> <p>第3章では、近年の核融合発電プラントの概念設計をレビューし、設計のバリエーションに関わらず発電形式が核分裂原子力の軽水炉方式以外ほとんど見られないことに留意した。そこで続く4章では発電システムとしての特性をモデル化し、トカマク方式のプラズマディスラプションに代表される計画外停止現象が方式の如何に関わらず核融合発電に共通の問題として想定されることに着目し、プラントにおける発電システムの停止現象を分析した。その結果、ランキンサイクルにおける変動が核分裂等他の電源に比べて大幅に短い時定数であること、そのためプラント保護のための停止動作や設計上の対応、電力系統からの即時解列が必要であることを見出した。さらにその解析結果から、従来の核融合炉設計において検討が十分でない発電装置としての特性を考慮した場合には、異なる設計上の要求や制約があることを指摘し、今後の具体的な核融合炉設計に必要な新たな知見を摘出した。</p> <p>第5章では、前章で得られた核融合発電所の停止現象が電力系統、特に第3章で分析した核融合炉の導入が想定される将来型の系統に与える影響を分析するために、まず電力システムを一般的に記述し、過渡現象に対して系統周波数を迅速かつ</p>			

精度よく分析するモデルを **Heffron-Philips** モデルを基盤に構築した。特に将来大きな割合を占めると想定される太陽光や風力などの再エネについては自然条件による統計的な変動を考慮し、従来より標準的に使用されてきた電中研の Y 法によるベンチマークを行い、十分な精度で、より多く一般的な電力系統の挙動を、短時間で簡便に分析できることを確認した。次に約 100 万ケースの電力系統に与える核融合発電所の計画外停止現象を分析して数多くのパラメータで記述される影響群を一般性を失わずに表現する S-T ダイアグラムを考案して表示し、電力系統の安定性を確保できる系統容量、電源構成と核融合炉の諸特性の関係を明らかにした。

第 6 章では、この結果から核融合炉の緊急停止から即時解列に至る時定数が核融合発電所の導入可能な電力系統が制限される条件が定量的に導かれることを利用して、その条件を緩和するために核融合プラントの設計において可能な対策を検討した。プラズマからの出力の急速な喪失の緩和措置として、冷却水系における熱容量を増加するための蓄熱装置を蒸気発生器に組み込むことと、蓄電装置を併設することを検討し、系統周波数偏差を 0.2Hz 以内に制御するために必要な設計諸元を明らかにするとともに、いずれも技術的に可能な範囲であることを示した。

第 7 章では、このようにして電源系統への導入が可能となる核融合発電について、将来型の自由化された電力市場における経済的な導入戦略を考察した。従来型の固定した発電単価に基づいた経済性評価の適用が困難であることから、前章 2 案に加えアンシラリーサービスによる計画外停止への対応を考慮し、緊急停止頻度を変化させた場合の変動する電力価格を、**Matlab** 上に構築した電力自由化市場のモデルによって分析し、それらが発電所の特性と結合する系統により大きく異なることを見出した。計画外停止事象はインバランス料金を発生するため、電源としての核融合発電の経済性は大きな負の感受性を持つ。このことから計画外停止頻度とその対策により、リアルタイム、一日先物、一年先物の異なる市場で異なる市場で異なる方式で契約する電源として運用することが必要であることを指摘し、最適戦略を示した。一方、蓄電装置機能を本来的に必要とする核融合発電はそれらを用いたアンシラリーサービスでの調整力供給も可能であり、総合的な電力源として、未来型の電力市場に適合することができ、社会全体として、先進技術としての核融合発電の可能性を最適化することができる。

第 8 章は結論であり、核融合発電所の設計可能なパラメータ領域を、一般化した電源としてのモデルと一般化した将来型電力系統と自由化市場の多変数空間において求める方法論の構造としてまとめている。

以上の結果を通じ、本論文は核融合エネルギーシステムの研究において従来考慮されてこなかった電力系統への適合性の問題について、特に最大の課題のひとつである、計画外停止現象とその対策を、電力システムの周波数安定性の観点で一般化し、定量的な解を得て電源としての成立性の確保するための重要な指針を与えたものである。その過程において、現在精力的に開発が進められている核融合発電について、エネルギー変換装置としての一般化した特性を分析し、設計上の新たな知見を提示する一方、将来の世界の電力系統を記述する独創的な方法を開発し、より一般的にはエネルギー環境問題に先進技術とその社会実装を以て解決を与えるための画期的な方法論として報告するものである。

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、将来の核融合発電プラントの導入に際し、現在とは大きく異なると想定される電力系統の特性を考察し、その安定性に着目して、計画外停止が一定の確率で避けがたいと考えられる核融合の特性からその適合性を分析し、核融合炉設計における主要諸元の選択の指針を示すとともに、自由化された電力市場における導入戦略を考察した研究成果をまとめたものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

(1)現在開発と設計検討が進められている核融合発電所について、その発電プラント部の基本方式が圧力水型軽水炉のランキンサイクルに基づくことに着目し、また核融合発電所がプラズマ出力の急な消滅に伴う停止現象が想定されることから、その事象の発電システムへの影響をモデルで解析し明らかにした。一方、核融合の導入される将来の先進国および途上国の電力系統の多くは現在の先進国にみられる火力発電中心の系統構成と異なり、より小規模で、また再エネ等の需要応答性のない電源が主要であることを指摘し、計画外停止現象による過渡現象としての周波数変動を表す独自のモデルを開発して解析し、核融合発電所の電力系統への適合性を求める方法を開発して、その受容可能なパラメータ範囲を明らかにした。

(2)計画外停止に伴う変動を許容範囲とするための核融合プラントの蓄電ないし蓄熱の必要性を指摘し、その具体的な方策を示すとともに、核融合プラントの導入可能対象系統の制約から、工学的な対応の成立可能性を明らかにした。

(3)核融合発電の経済性評価に一般的に用いられてきた固定的発電コストが、将来型の自由化電力市場において使用困難であることを指摘し、変動する電力価格と、実需要までの異なる時間範囲での電力卸売市場における評価法を開発した。その結果を用いて、自由化電力市場において、停止現象の頻度と蓄電等による負荷追従性に応じて核融合発電の効用を最大化する導入戦略を見出した。

以上の結果は、核融合発電プラントの開発において、新たに電力システムへの適合性という視点を導入することにより、従来知られていなかった具体的な導入のための必要要件とその工学的な対応を提示するとともに、エネルギー発生装置としての開発指針を与えるもので、核融合エネルギーの利用技術としての成立のための戦略の構築に大きく貢献するものである。さらに、将来社会の持続可能なエネルギー供給システムと、そこでの先進的なエネルギー源の適合のための方法論を明らかにすることで、将来のエネルギー環境問題に大きな貢献を示しうる独創的な成果であって、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（エネルギー科学）の学位論文として価値あるものと認める。

また、平成30年2月22日実施した論文内容とそれに関連した試問の結果、合格と認めた。

論文内容の要旨、審査の結果の要旨及び学位論文の全文は、本学学術情報リポジトリに掲載し、公表とする。ただし、特許申請、雑誌掲載等の関係により、要旨を学位授与後即日公表することに支障がある場合は、以下に公表可能とする日付を記入すること。

要旨公開可能日： 年 月 日以降